CIRRELT

Centre interuniversitaire de recherche
sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport

Interuniversity Research Centre
on Enterprise Networks, Logistics and Transportation

Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre

Marie-Pier Trépanier
Leandro C. Coelho

Février 2017

CIRRELT-2017-08

Document de travail également publié par la Faculté des sciences de l'administration de l'Université Laval, sous le numéro FSA-2017-001.

Bureaux de Montréal :
Université de Montréal
Pavillon André-Aisenstadt
C.P. 6128, succursale Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada H3C 3J7
Téléphone : 514 343-7575
Télécopie : 514 343-7121

Bureaux de Québec :
Université Laval
Pavillon Palasis-Prince
2325, de la Terrasse, bureau 2642
Québec (Québec)
Canada G1V 0A6
Téléphone : 418 656-2073
Télécopie : 418 656-2624

www.cirrelt.ca

Université Laval · McGill · Concordia · ÉTS · UQÀM · HEC Montréal · Polytechnique Montréal · Université de Montréal

Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre

Marie-Pier Trépanier, Leandro C. Coelho*

Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT) et Département d'opérations et systèmes de décision, 2325 de la Terrasse, Université Laval, Québec, Canada G1V 0A6

Résumé. Au cours des dernières années, l'immense volume de flux de marchandises a considérablement augmenté le transport routier dans les villes. Cela a fortement affecté la congestion routière et les émissions environnementales en plus de soulever l'importance de la recherche dans le cadre de ce que l'on appelle la logistique urbaine. Le transport routier de marchandises est un important contributeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES) et à la consommation de carburant. Cette recherche vise à cibler les différentes méthodes de calcul de GES existantes, examiner les facteurs influents qu'elles tiennent compte et les comparer, et ce, dans le transport routier de véhicules lourds plus spécifiquement. Cet article est une révision de littérature plus complète qui présentera une liste complète des facteurs d'émissions, une mise à jour des méthodes de calcul d'émission de GES ainsi que certains outils qui les évaluent également.

Mots-clés. Transport routier, consommation d'essence, gaz à effet de serre (GES), émission des GES.

Remerciements. Nous remercions la Chaire de recherche du Canada en logistique intégrée et le Centre d'innovation en logistique et chaîne d'approvisionnement durable pour leur soutien financier.

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

---

* Auteur correspondant: Leandro.Coelho@cirrelt.ca

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec
Bibliothèque et Archives Canada, 2017

© Trépanier, Coelho et CIRRELT, 2017

1. INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROBLÈME

Il existe de multiples types d'émissions de gaz à effet de serre, certains naturels, mais la majorité provient des activités humaines. Ces types d'activités occasionnent des émissions de gaz ayant de longues durées de vie, les principaux étant les suivants : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et les hydrocarbures halogénés (un groupe de gaz contenant du fluor, du brome et du chlore). Le CO_2 représente le gaz le plus dégagé et est suivi en deuxième position par le CH_4.

Selon Environnement Canada, le secteur économique qui a dégagé le plus d'émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2014 est l'exploitation pétrolière et gazière qui représente 26% de toutes les émissions au pays avec 192 mégatonnes (Mt) suivies de près par le transport avec 23% et 171 Mt. Depuis 1990, les émissions de GES causés par le transport ont augmenté de 32% dont la principale cause est le transport de marchandises, qui a augmenté quant à lui de 132%. Parmi tous les types de transport, le transport de marchandises a créé 40% des émissions de CO_2 en 2014 [1].

Le besoin de réduire les émissions de GES causés en grande partie par le transport routier de marchand.ses est imminent. Les émissions provenant du transport routier de marchandises proviennent de plusieurs facteurs. Nos objectifs spécifiques sont de comprendre quels facteurs influencent les émissions générées par les camions : la charge, la vitesse, la congestion routière, les caractéristiques physiques des camions, etc. Il existe 27 facteurs connus qui sont classifiés dans quatre catégories distinctes pour les fins de ce document. Il y a ceux reliés aux caractéristiques du véhicule, ceux reliés aux caractéristiques du véhicule, du trajet, du trafic et environnementales. Une fois ces éléments connus, il sera plus facile de mieux cibler les principales sources d'émission et de les réduire du même coup. Ces informations seront bénéfiques pour les gestionnaires de flottes et ceux qui planifient les tournées de véhicules qui tentent de planifier du mieux que possible des itinéraires de livraison qui satisferont toutes les contraintes de service. En ayant connaissance de ces informations, ils seront en mesure de créer des routes qui diminueront à la fois les émissions et leurs coûts de consommation de

carburant. Ces améliorations réduiront la quantité de GES dans l'atmosphère et en feront bénéficier l'environnement. (Bektaş et al, 2011) [2].

La quantité de facteurs influençant la consommation d'essence rend la tâche de calcul complexe et la précision difficile. Pour plusieurs de ces derniers, la quantification est une estimation, ce qui met place à des doutes quant à la validité des calculs. De plus, plusieurs facteurs sont incontrôlables et imprédictibles, mais mesurables, tels que la vitesse, l'état de la chaussée et plusieurs facteurs environnementaux. Tandis que d'autres facteurs sont contrôlables, mais difficiles à quantifier ou à évaluer tels que la maintenance du véhicule et le relief de la route. Par ailleurs, dans la catégorie des caractéristiques des véhicules, on retrouve des facteurs pouvant tous être contrôlés. C'est-à-dire, il est possible de les choisir de sorte à influencer la consommation de carburant. Par exemple, l'âge et l'aérodynamisme du véhicule. Ce sont les gestionnaires de flottes qui prennent les décisions quant au moment de changer les véhicules lorsqu'ils sont trop âgés afin d'être plus écologique ou bien même lors de l'achat d'un véhicule, choisir un modèle ayant plus de caractéristiques aérodynamiques ou tout simplement en modifiant les véhicules actuels en leur ajoutant des éléments aérodynamiques. Des économies tant au niveau des émissions qu'au niveau financier pour l'entreprise seront ressenties en plus d'avoir un effet positif sur l'environnement.

Les émissions de CO_2 sont directement proportionnelles à la consommation d'essence des véhicules [3]. Afin de quantifier les émissions, plusieurs méthodes de calcul ont vu le jour dans les dernières décennies. Chaque méthode prend en compte différents facteurs influençant la quantité d'émissions de GES évaporés. En moyenne, entre 6 et 14 facteurs sont pris en compte dans ces dernières. D'ailleurs, certains ne sont pris en compte dans aucune méthode. Alors, il y a des méthodes plus appropriées que d'autres selon les situations étant donné qu'elles considèrent toutes des facteurs différents. Il y en a qui donnent de meilleurs résultats pour de petites ou longues distances par exemple, pour des situations de trafic variées ou tout simplement quand des informations spécifiques sont manquantes, des modèles moins complets satisferont mieux les attentes. C'est pour cette raison, que de connaître mieux les facteurs et lesquels sont les plus

importants dans quelles circonstances, sera bénéfique pour toute entreprise de les identifier afin de minimiser leurs consommations de carbone. D'ailleurs, la grande majorité des facteurs demandent une difficulté élevée de calcul, il faut avoir les connaissances nécessaires afin d'être en mesure de les effectuer. D'où l'existence d'outils et de logiciels. La variabilité d'émissions d'un transport à un autre est énorme et, comme il est mentionné, dépend de plusieurs éléments. Notons que ce ne sont pas tous les facteurs qui ont le même impact sur les émissions. En effet, certains vont influencer plus fortement les émissions de GES comparativement à d'autres.

Une analyse comparative entre six modèles de calculs a été effectuée par Demir et al. en 2011 [4]. L'étude démontre la comparaison de résultats dans divers scénarios et tient compte de 15 facteurs. En 2014, les mêmes auteurs proposent une révision des modèles en les séparant en 2 catégories distinctes, les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques [5]. La première catégorie inclut les modèles qui sont plus appropriés pour calculer les émissions de petits environnements, telle qu'une flotte de transport d'une entreprise. La deuxième catégorie est permet d'estimer les émissions sur un espace plus large, tel que le parc de véhicules d'une province. Ils discutent également des applications de ces modèles dans le transport routier de marchandises. Nouri et al. (2015) [6] décomposent les impacts que différents facteurs (quelques-uns en communs avec Demir et al. (2011)) ont sur les émissions.

Dans cet article, tous les facteurs seront énoncés, décrits et analysés en plus d'y retrouver les méthodes de calcul existantes mises à jour et certains outils qui calculent également les émissions de GES.

Cet article est structuré comme suit. La section 2 décrit et analyse les facteurs d'émission de GES. La section 3 expose l'ensemble des méthodes de calcul mises à jour et quelques outils aidant à l'estimation des émissions. Elles sont décrites, avec les facteurs qu'elles considèrent et dans quel cas elles sont les plus susceptibles d'être mieux adaptées. Ensuite, une analyse et évaluation est présentée à la section 4 suivie d'une conclusion à la section 5.

2. CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES

Dans cette section, tous les 27 facteurs influençant les émissions de GES sont décrits. La Figure 1 les énumère tous sous quatre catégories générales. Ils sont ensuite élaborés en détail dans les sections 2.1 à 2.4.

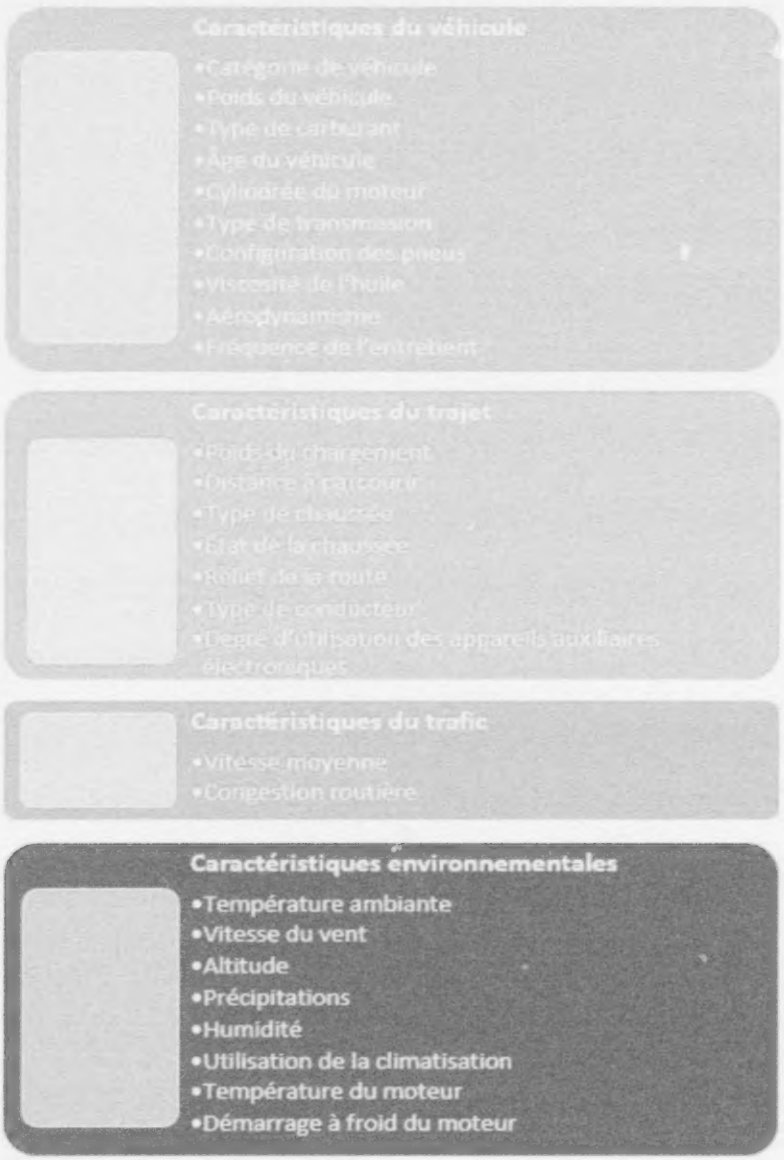

Figure 1 : Facteurs d'émissions de GES

2.1 Caractéristiques du véhicule

Dans la catégorie des caractéristiques du véhicule, on y retrouve 10 facteurs différents qui sont énumérés et décrits dans cette section.

2.1.1 Catégorie de véhicule

Les émissions sont différentes d'un type de véhicule à un autre. Par exemple, il y a des autobus, des automobiles, des camions légers, des motocyclettes, et tout autre véhicule hors route, tel que les récréatifs (moto neige, quatre-roues, etc.) et la machinerie (tracteurs, tondeuses, souffleuses, balayeuses de rues, etc.). De plus, un camion lourd peut contenir différentes caractéristiques, telles que le nombre d'essieux, le nombre de remorques, la longueur de la remorque, etc. [7, 8]. Ce facteur est alors contrôlable lors de l'achat d'un véhicule. Souvent, les besoins de l'entreprise vont fortement guider le choix de ses caractéristiques. Toutefois, en étant au courant des effets que ces caractéristiques ont au niveau économique et environnemental, la décision peut être prise en considérant autre chose que les besoins de l'entreprise en rapport à sa flotte de transport.

2.1.2 Poids du véhicule

Le poids du véhicule joue un rôle très important en ce qui a trait aux émissions. Aux États-Unis, entre les années 1975 et 1985, le poids d'un véhicule moyen a diminué, puis a augmenté considérablement jusqu'en 2005 [9]. Au cours des dernières années, la tendance est demeurée plus stable. Le resserrement progressif de la législation fédérale en matière de consommation de carburant a fait une différence. Il est de plus en plus courant de voir des fabricants de véhicules promouvoir leurs initiatives de réduction du poids. Les fabricants réduisent le poids des véhicules en recourant à des matériaux plus légers, comme l'aluminium et des composites de pointe, tout en apportant des modifications à la conception. Ces améliorations permettent de réduire davantage le poids des véhicules puisque la taille d'autres composants peut être réduite, permettant en fin de compte de fabriquer de plus petits moteurs

sans nuire au rendement, alors plus le poids est réduit, moins de puissance est requise.

En 2007, une étude du Massachusetts Institute of Technology (MIT) a estimé que, d'ici 2035, une réduction de 35% de la consommation de carburant serait observée, accréditée à la diminution de 20% des poids des véhicules à leur fabrication [10]. Ces estimations tiennent compte du poids supplémentaire attribuable aux futures composantes exigées en matière de sécurité et aux caractéristiques de confort. Une réduction de poids de cette ampleur pourrait réduire la consommation de carburant du véhicule sans nuire aux caractéristiques actuelles de sécurité et de rendement du véhicule.

2.1.3 Type de carburant

Les émissions d'échappement de CO_2 varient selon le type de carburant en raison de leur densité différente. Les carburants d'hydrocarbures plus denses, comme le diesel, renferment plus de carbone et, par conséquent, produiront davantage de CO_2 pour un volume donné de carburant. À l'inverse, l'éthanol engendre seulement 1,61 kg de CO_2 par litre, tandis que la moyenne se trouve autour de 2,34. D'autres carburants existent comme l'essence, le gaz naturel, le GPL, etc. Toutefois, les 2 principaux carburants utilisés dans les véhicules lourds sont l'essence et le diesel. Ils ont des caractéristiques totalement différentes. Les émissions d'échappement de CO_2 de divers carburants de transport sont fournies dans le tableau ci-dessous :

Type de carburant	Émissions d'échappement de CO_2 (kg/l)
Essence	2,29
E10 (10 % éthanol + 90 % essence)	2,21
E85 (85 % éthanol + 15 % essence)	1,61
Diesel	2,66
B5 (5 % biodiesel + 95 % diesel)	2,65
B20 (20 % biodiesel + 80 % diesel)	2,62

Tableau 1 : émissions d'échappement de CO2 de divers carburants de transport [11]

2.1.4 Âge du véhicule

L'âge du véhicule peut se calculer en kilométrage ou en année. Dans tous les cas, plus le véhicule est vieux, plus il est polluant, et ce, dû à la dégradation de son système de contrôle d'émissions. Grâce à l'avancement technologique des dernières décennies, les véhicules sont beaucoup plus économiques et polluent moins. En effet, Paré-Le Gal (2009) a démontré que les véhicules de 1995 et moins représentaient seulement 20% du parc automobile du Québec, tout en étant responsables de 80% de la pollution automobile [12]. Et c'est d'autant plus applicable aux camions lourds puisqu'ils occupent beaucoup de place sur le réseau routier dans le monde, en particulier québécois et canadien.

En outre, de petites variations dans les procédés de fabrication des véhicules peuvent causer des différences dans la consommation de carburant entre deux véhicules de même marque et de même modèle, et certains véhicules n'atteignent pas la consommation optimale de carburant avant d'avoir roulé de 6 000 à 10 000 km [3]. Toutefois, on ne peut dire que le fait d'opérer un vieux véhicule soit un important facteur d'émissions.

2.1.5 Cylindrée du moteur

La cylindrée est le volume total de tous les cylindres et est exprimée en litres. Que ce soit à essence ou diesel, la cylindrée d'un moteur diffère d'un camion à l'autre. La cylindrée est mesurée par litres et est considérée comme la grosseur du moteur. D'un côté, plus la cylindrée sera petite, moins il y a d'émissions, mais de l'autre côté, plus la cylindrée est petite, moins le véhicule a de puissance. Alors, dans le cas de véhicules lourds, une force minimum est essentielle. D'ailleurs, de nouvelles technologies existent afin d'adapter la cylindrée d'un camion, tout dépendamment celle dont le véhicule nécessite au moment de l'utilisation. Par exemple, un camion vide a besoin de beaucoup moins de force que lorsqu'il est plein, donc l'outil technologique permettra de réduire la puissance du moteur pour le besoin actuel et s'ajuster lorsqu'il sera plein, etc. Alors, la cylindrée du moteur affecte énormément les émissions de GES.

2.1.6 Type de transmission

La transmission représente le moyen de couplage entre le moteur et les roues d'un véhicule. Elle occasionne des pertes d'énergie qui varient d'une catégorie de véhicule à l'autre. Le type de transmission influence la consommation de carburant, donc par le fait même, les émissions. Il existe divers types de transmissions fréquemment retrouvées dans les véhicules lourds, tels que la manuelle, le double débrayage, l'automatique et l'automatisée. Les deux derniers types sont ceux qui peuvent améliorer l'efficacité énergétique d'un véhicule lourd. Elles éliminent le changement de vitesse manuel alors la différence majeure réside dans l'utilisation ou non d'un embrayage. Les principaux avantages d'une transmission automatique sont le changement de rapport à pleine puissance qui procure une meilleure accélération, des vitesses moyennes plus élevées (important pour des cycles courts avec beaucoup d'arrêts et de départs) et une économie accrue de carburant. Le meilleur moyen de réduire la consommation de carburant est de s'assurer que le moteur travaille dans la gamme optimale de tours par minute pour l'efficacité énergétique. Une transmission automatique permet alors de réduire au minimum le temps passé hors de cette gamme [8].

Pour les véhicules lourds, le choix de la transmission se fait en même temps que celui de la spécification du moteur. Ces deux choix sont liés puisqu'on cherche à optimiser la zone de fonctionnement du moteur pour un cycle de travail représentatif. Néanmoins, si on compare une transmission automatique et une transmission manuelle, elles n'ont pas une énorme différence en termes d'émissions. D'ailleurs, ce facteur n'est pris en compte dans aucune méthode de calcul.

2.1.7 Configuration des pneus

Des pneus de faible résistance au roulement peuvent aider à moins consommer. Les pneus, surtout à cause de ce dernier aspect, représentent entre 20 et 30 % de la consommation de carburant des véhicules [13]. D'ailleurs, le bon gonflage des pneus joue un rôle important dans les émissions de CO_2. D'après des tests réalisés par Stephen Boucher, en choisissant bien ses pneus, il est possible de réduire de 10 % la consommation en carburant du véhicule [14]. Des pneus verts permettent des gains considérables, en contrepartie, la tenue de route est en retrait par rapport aux pneus classiques, il faut en être conscient. La distance de freinage est plus grande avec des pneus verts.

2.1.8 Viscosité de l'huile

La viscosité de l'huile motrice est une mesure de résistance à l'écoulement d'un fluide. Elle s'exprime par deux grades; un grade à froid et un grade à chaud.

La viscosité d'une huile est la mesure de l'épaisseur ou de sa résistance à l'écoulement en fonction de la température. La viscosité est définie par 2 grades : un grade à froid et un grade à chaud. Le premier grade indique la fluidité de l'huile à froid, c'est la capacité à démarrer le moteur et à amorcer la pompe à huile. Plus il est faible, plus l'huile est fluide. Le second indique la performance du lubrifiant à haute température. Plus il est élevé, plus épais sera le film d'huile à chaud alors plus l'huile supporte de hautes températures ce qui favorise la protection et l'étanchéité. Toutefois, plus le nombre est bas, meilleure est la réduction de frottement à chaud, il favoriser donc les économies de carburant. En bref, le choix de l'huile n'a que de petites répercussions sur les émissions des GES.

Le choix de la viscosité est en fonction des caractéristiques du véhicule et des habitudes du conducteur. Le choix dépend de la longueur des trajets que le camion a l'habitude de parcourir, si la circulation sera majoritairement urbaine ou plutôt autoroute, etc.

2.1.9 Aérodynamisme

Une caractéristique de plus en plus étudiée dans le transport routier est l'aérodynamisme. De grandes économies de carburant sont possibles grâce à divers dispositifs installables sur les véhicules ainsi que plusieurs ajustements faisables sur les camions et les remorques. Le Conseil national de recherches du Canada a effectué une étude en testant 20 changements qui affectent l'aérodynamisme de camions lourds sur de longues distances [15]. En combinant tous les éléments, ils sont arrivés avec une économie de 25% de litres de carburant. Ce n'est donc pas un facteur à négliger d'autant plus que celui-ci est 100% contrôlable par les gestionnaires de flottes de transport.

Les quatre principales zones ciblées afin de minimiser la traînée sont, l'avant du tracteur, l'espace entre le tracteur et la remorque, les côtés et le dessous de la remorque et finalement l'arrière de la remorque. De plus, avoir les fenêtres ouvertes est aussi un exemple de diminution de l'aérodynamisme du véhicule, spécialement à haute vitesse.

Et maintenant, voici des exemples d'équipement duquel un véhicule lourd peut se munir [16] :

- *Tracteur* : déflecteur et carénage de toit de cabine, extensions latérales de cabine, carénages qui recouvrent les réservoirs et le châssis du tracteur, rétroviseurs aérodynamiques, pare-chocs aérodynamique, pare-soleil *aérodynamique*.
- *Remorque* : jupes latérales pour semi-remorque, toile étanche rétractable pour semi-remorque ou camion à benne, déflecteur pour essieux de semi-remorque.

Le facteur de l'aérodynamisme est primordial dans le calcul des émissions de GES.

2.1.10 Fréquence de l'entretien

Un entretien régulier et efficace est bénéfique pour tous les véhicules. Dans une étude de l'entretien des véhicules, il est constaté que plus de 60% des

véhicules avaient une moyenne de 5% d'amélioration de l'économie de carburant après l'entretien. Cela était particulièrement évident sur les véhicules plus anciens qui n'ont pas de système de gestion de moteur en boucle fermée [17]. L'entretien du véhicule peut améliorer l'efficacité du carburant en diminuant la résistance de frottement particulière et donc en augmentant l'efficacité thermodynamique. L'effet de l'efficacité thermodynamique est habituellement déterminé dans le calcul de la demande de puissance qui a été discuté dans la section précédente [6]. Néanmoins, la qualité ou la fréquence de l'entretien ne constitue pas un paramètre dans quelconque méthode de calcul des émissions.

2.2 Caractéristiques du trajet

La catégorie des caractéristiques du trajet est très importante et 7 facteurs y sont expliqués. Ces derniers sont généralement gérés par les humains, donc ce sont des facteurs assez contrôlables jusqu'à un certain point.

2.2.1 Poids du chargement

Comme il est discuté précédemment dans le facteur du poids du véhicule, le poids du chargement est un facteur majeur concernant les émissions de GES et est en lien direct avec la consommation de carburant. De son côté, il est contrôlable et c'est alors primordial d'en tenir compte pour une plus grande économie d'essence, une diminution de la désagrégation de la route, pour la sécurité de tous et plusieurs autres avantages.

Dans la figure 2 (page suivante), on voit que, sur la tranche de charge utile de 1 à 10 tonnes, il y a une réduction marquée du facteur d'émission de carbone. Ensuite, le taux de réduction est relativement bas. Le deuxième graphique agrandit la partie inférieure de la courbe et montre de modestes avantages dans la diminution de la charge utile qui peuvent avoir un impact positif sur le facteur d'émission. Ensuite, l'augmentation de la charge de 20 à 26 tonnes, par exemple, réduit les émissions de CO_2 de 48 à 41,5 tonnes par kilomètres. Tandis que le CO_2 émit d'un véhicule de 44 tonnes a une relation exponentielle

négative avec le poids de la charge utile. Ces calculs ne tiennent pas compte du parcours à vi[illegible] du camion.

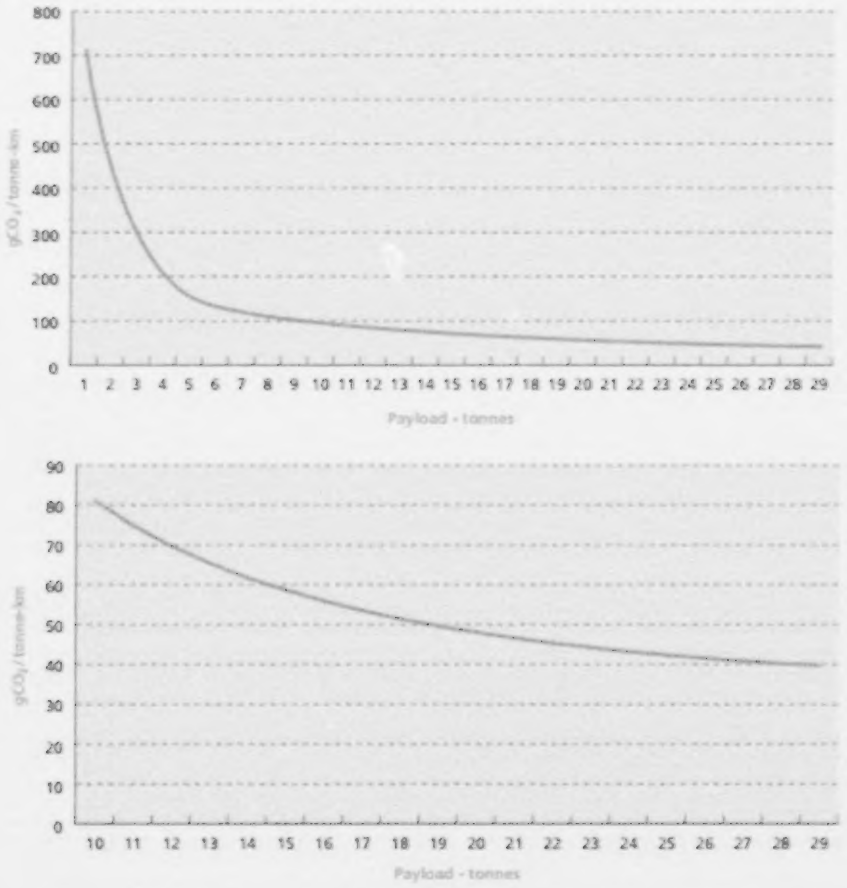

Figure 2 : Variation du facteur d'émission selon la charge utile [11]

2.2.2 *Distance à parcourir*

Dans un même environnement, plus la distance à parcourir sera petite, moins il y aura d'émissions de CO_2. Pour diminuer les distances, plusieurs problèmes de tournées de véhicules (VRP) existent.

2.2.3 *Type de chaussée*

Différents types de chaussée existent et leurs comportements changent d'une sorte à l'autre en augmentant ou en diminuant la force de friction. Ce qui diffère

entre les chaussées est leurs compositions. Il est souvent impossible de remarquer à l'œil nu quel type de chaussée il est question, car les principales caractéristiques de chacune se cachent sous la couche de surface. Il existe trois types de chaussées, les chaussées souples (traditionnelles et à bitumineuses épaisses), les chaussées semi-rigides (à assise traitée aux liants hydrauliques, à structure mixte et à structure inverse) et les chaussées rigides béton (classique et à dalle épaisse). Évidemment, plus une chaussée est rigide, moins le véhicule doit forcer et moins d'émissions sont dégagées.

Pour l'utilisation de ce facteur dans les méthodes de calcul d'émissions de GES, trois sortes de chaussées sont considérées, l'asphalte, le béton et le composite.

2.2.4 État de la chaussée

L'état de la chaussée est particulièrement considérable dans un pays où l'hiver est présent et surtout dans une province où il est assez féroce. Les changements de températures, la quantité d'investissements gouvernementaux, l'utilisation du transport routier comme principal mode de transport des entreprises sont tous des aspects qui nuisent à l'état des routes. En effet, moins une route est lisse, plus les émissions de GES augmentent. Il est toutefois très difficile, pour ne pas dire impossible, de bien estimer ce facteur, mais une chose est sûre, il a une très grande incidence sur les émissions de CO_2.

Pour les besoins des méthodes de calcul des émissions de GES, deux types d'états de chaussée sont considérés seulement soit pendant deux saisons, l'été et l'hiver [18]. C'est une vague estimation, mais les données réelles seraient impossibles à récolter en temps réel. Toutefois, ce sont des caractéristiques assez précises pour que l'on remarque que l'effet sur les émissions de GES est important.

2.2.5 Relief de la route

Le relief de la route, mesuré en degré, joue un rôle dans la consommation d'essence d'un véhicule lourd. Si le camion doit monter une pente abrupte, il

devra consommer beaucoup plus de carburant que s'il était dans une pente descendante. Toutefois, le moyen pour consommer le moins de carburant possible est la constance, c'est-à-dire de rouler sur une route avec un relief de zéro, soit à plat. Il est facile de déterminer le gradient d'un segment de route. Cependant, ce qui rend complexe la considération de ce facteur dans les méthodes de calcul de GES, c'est qu'il n'existe aucune base de données ayant tous les degrés de toutes les rues afin de les corréler à une tournée de véhicule. Par contre, ce facteur influence d'autres facteurs plus faciles à quantifier comme la consommation de carburant par unité de distance. Donc, il est possible de prendre en compte ce facteur par l'entremise d'autres variables.

2.2.6 Type de conducteur

Le comportement du conducteur va aussi affecter de beaucoup les émissions. Comme mentionné précédemment, la constance dans la vitesse est la façon de consommer le moins possible. Toutefois, ce facteur dépend beaucoup du type de conduite du chauffeur. Le mode de conduite à une incidence directe sur les émissions de GES. Les accélérations rapides, les freinages fréquents, les faibles vitesses de longue durée peuvent augmenter la consommation de carburant jusqu'à 25%. Ce facteur est très lié au facteur du type de transmission. Comme il a été mentionné, l'optimalité peut être atteint avec la transmission automatique pour ne pas laisser place à de variations non nécessaires de la part du conducteur. Lorsque l'on compare la consommation de carburant d'un automobiliste calme et d'un automobiliste agressif, on remarque jusqu'à 40% de différence dans la consommation de carburant [11]. Ce facteur est plus ou moins contrôlable, c'est-à-dire que le gestionnaire de flotte de transport peut sensibiliser les chauffeurs en leur offrant de la formation par exemple. Toutefois, il ne sera jamais en mesure de contrôler totalement le mode de conduite des conducteurs. Le type de conducteur n'est malheureusement pris en compte dans aucune des méthodes de calcul existantes dû à sa dynamique difficilement contrôlable.

2.2.7 Degré d'utilisation des appareils auxiliaires électroniques

Quoique son effet soit moins important que plusieurs autres facteurs, le degré d'utilisation des appareils auxiliaires électroniques peut augmenter les émissions de GES. Ce sera surtout lors de longs trajets, lorsque les chauffeurs sont dans une halte de longue durée, l'utilisation des ports auxiliaires demandera plus d'énergie. Pour contrer ces émissions, il existe des systèmes électriques auxiliaires qui fournissent l'électricité à l'équipement et aux accessoires à partir de batteries qui est plus écologique.

2.3 Caractéristiques du trafic

Dans cette catégorie, 2 caractéristiques importantes sont décrites, la vitesse moyenne et la congestion routière. La vitesse, étant constamment en variation selon des situations totalement incontrôlables, a une nature très dynamique et c'est pour cette raison qu'elle est très difficile à mesurer avec exactitude. Différentes méthodes de calcul d'émissions de GES vont prendre comme mesure la vitesse moyenne. Tandis que d'autres vont prendre le type de congestion routière ou le type d'environnement (rural, urbain, etc...). Ce qui est important à noter sont les sérieux effets qu'ont la vitesse, l'accélération et la décélération sur les émissions de GES.

2.3.1 Vitesse moyenne

Il existe maintenant des dispositifs sur les véhicules qui calculent toutes sortes de données, tels que la vitesse moyenne entre deux points. Certaines méthodes de calcul utilisent cette donnée. Elle tiendra compte de la moyenne entre toutes les accélérations et les décélérations pendant une période. Cette donnée est ensuite utilisée pour calculer la consommation moyenne de carburant dans un trajet, normalement exprimée en consommation de litres / 100 kilomètres. Cette dernière ne démontre pas beaucoup de précision puisque les effets des accélérations en soi ne sont pas clairement démontrés.

2.3.2 Congestion routière

Il existe quatre types de congestion routière, en ordre décroissant de congestion : la congestion « stop & go », la congestion saturée, la congestion chargée et la congestion fluide. Certaines méthodes estimeront des facteurs pour chaque type de congestion et l'appliqueront à leurs modèles. Encore une fois, ce seront des données encore plus estimées, donc moins précises.

2.4 Caractéristiques environnementales

Les conditions climatiques ont un impact sur les émissions polluantes. Les facteurs influençant les émissions de GES de cette catégorie sont peu prédictibles, mais surtout, totalement incontrôlables. Spécialement dans un pays comme le Canada, on ne peut rien y changer, on peut seulement s'adapter et s'ajuster en conséquence. Le seul facteur de cette liste qui n'est considéré dans aucune méthode de calcul est l'humidité.

Les 8 facteurs de cette catégorie sont, dans la majorité des cas, évidents et simples à comprendre. D'ailleurs, ils sont très souvent connectés les uns des autres. Par exemple, la température a des effets directs sur plusieurs facteurs.

2.4.1 Température ambiante

Puisque les camions sont utilisés à l'extérieur et qu'ils restent souvent à l'extérieur aussi même s'ils ne sont pas en utilisation, la température ambiante viendra affecter énormément la consommation d'essence et donc, les émissions de GES.

2.4.2 Vitesse du vent

La vitesse du vent augmente la force d'inertie avec le véhicule en mouvement. Une légère augmentation de consommation d'essence est souvent observée dans les voyages lors de journées où le vent est plus présent.

2.4.3 Altitude

Dans les hautes altitudes, la pression atmosphérique de l'air est plus faible. Alors, la consommation d'essence diminue. En effet, plus la pression est basse, moins le moteur a besoin de moins d'octane à tirer correctement en raison de la basse pression ambiante. L'octane est une note attribuée à l'essence pour décrire sa performance « anti-coup ». La différence entre le carburant régulier et suprême est l'indice d'octane.

2.4.4 Précipitations

Encore une fois, la résistance augmente s'il pleut. Autant au niveau de l'accumulation de la pluie sur le sol que le contact entre les gouttes de pluie qui tombent et le véhicule en mouvement.

2.4.5 Humidité

Plus la présence d'humidité est faible, plus cela augmente la traînée aérodynamique sur le véhicule. Donc, c'est généralement en hiver que cela a un impact négatif sur les émissions.

2.4.6 Utilisation de la climatisation

Plus la température extérieure est élevée, plus l'utilisation de la climatisation à l'intérieur du véhicule risque d'être utilisée. Avoir l'air conditionné en fonction consomme beaucoup d'énergie. Effectivement, cette utilisation consomme plus d'énergie que la résistance au roulement et la traînée aérodynamique. Dans certains pays comme l'Inde, ce problème est majeur, 19,4% de la consommation de carburant est occasionné par l'utilisation de la climatisation et les États-Unis émettent un équivalent de 57,6 mg de CO_2 seulement par l'utilisation de cette dernière [6].

2.4.7 Température du moteur

Lorsque le véhicule est en marche, le moteur produit beaucoup de chaleur. Lorsqu'il fera très chaud à l'extérieur, le moteur doit fournir encore plus d'effort pour se refroidir afin d'éviter une surchauffe et cela aura aussi un effet sur l'émission de différents gaz.

De plus, quand la température ambiante est basse, la densité de l'air est plus élevée, ce qui accroît la résistance au vent. La vitesse moyenne du vent est aussi plus élevée en hiver, ce qui accroît la résistance aérodynamique et, par conséquent, la consommation de carburant. La vitesse moyenne du vent est aussi plus élevée en hiver, ce qui augmente la résistance aérodynamique et, par conséquent, les émissions de GES.

2.4.8 Démarrage à froid du moteur

Un facteur très important est celui du démarrage à froid du moteur. En effet, plus la température ambiante est basse, plus de carburant nécessite le moteur en démarrant. D'ailleurs, la consommation plus élevée de carburant n'est pas seulement lors du démarrage, mais également pendant les 5 premiers kilomètres effectués en moyenne [3]. Mettre le camion dans un garage est un exemple de solution permettant de diminuer les émissions dues à ce facteur impactant énormément les émissions de GES d'un véhicule lourd.

3. MODÈLES DES ÉMISSIONS DE GES

Plusieurs options s'offrent à tout gestionnaire de flotte afin de connaître l'impact de son transport routier sur l'environnement. D'abord, d'un niveau beaucoup plus analytique et mathématique, il existe six modèles de calcul différentes :

- Modèle instantané de consommation de carburant;
- Modèle global d'émissions modales (CMEC);
- Méthodologie de calcul des émissions de transport et de la consommation d'énergie (MEET);
- Modèle national d'inventaire des émissions atmosphériques (NAEI);
- Modèle de consommation de carburant élémentaire à quatre modes;
- Modèle de consommation de carburant en vitesse de marche.

3.1 Modèle instantané de consommation de carburant [4, 5]

Le modèle instantané de consommation de carburant, ou modèle instantané à court terme a été développé par Bowyer et al. (1985) [19] comme extension du modèle de puissance de Kent et al. (1982) [20]. Le modèle tient en compte des caractéristiques du véhicule telles que le poids, le type du carburant, la force de la traînée et des composantes de la consommation de carburant associé à l'aérodynamisme, la résistance au roulement et à la consommation de carburant par unité de temps. Ce modèle ne tient pas compte de données à plus grande échelle, tel que le nombre d'arrêts, mais il est capable de prendre en compte l'accélération, la décélération, la vitesse de croisière et les phases de ralenti.

Le modèle instantané fonctionne bien à un niveau de petite échelle et est mieux adapté pour les estimations d'émission de courte distance.

3.2 Modèle global d'émissions modales (CMEC) [4, 5]

Un modèle global d'émissions modales (CMEM) pour les poids lourds a été développé et présenté par Barth et al. (2000, 2005) [21, 22], puis par Barth et Boriboonsomsin (2008) [23]. Le CMEM suit, dans une certaine mesure, le modèle de Ross (1994) [24] et se compose de trois modules, à savoir la puissance du moteur, la vitesse du moteur et le taux de carburant.

Le CMEM utilise une approche physique de modélisation modale de la demande de puissance basée sur une représentation analytique paramétrée de la production d'émissions. Dans un tel modèle physique, l'ensemble du processus d'émissions est décomposé en différentes composantes qui correspondent à des phénomènes physiques associés au fonctionnement du véhicule et à la production d'émissions. Chaque composante est alors modélisée comme une représentation analytique constituée de divers paramètres du procédé. Ces paramètres varient en fonction du type de véhicule, du moteur et de la technologie d'émission. La majorité de ces paramètres sont donnés par les fabricants de véhicules et sont facilement disponibles. Par exemple, le poids du véhicule, la cylindrée du moteur, l'aérodynamisme, la viscosité de l'huile, le type de carburant, etc. D'autres

paramètres clés relatifs au fonctionnement du véhicule et à la production d'émissions doivent être estimés.

Le modèle d'émissions modales développé est de nature microscopique, ce qui signifie qu'il peut être facilement appliqué à l'évaluation des émissions à partir de cycles de conduite spécifiés ou intégré directement avec des simulations de trafic à petite échelle. Toutefois, son utilisation pour estimer des émissions régionales plus importantes est un peu plus compliquée.

Le CMEC est semblable au premier modèle présenté, le modèle instantané de consommation de carburant. Toutefois, pour la précision, ce modèle exige des paramètres détaillés spécifiques au véhicule et l'estimation de plusieurs autres facteurs. Donc, il est plus complexe de l'utiliser, mais donne d'excellents résultats puisqu'il tient en compte plus de facteurs.

3.3 Méthodologie de calcul des émissions de transport et de la consommation d'énergie (MEET) [4, 5]

Hickman et al. (1999) [25] ont étudié les facteurs d'émission pour le transport routier et ont décrit une méthodologie appelée MEET utilisé pour calculer les émissions de transport et la consommation d'énergie des véhicules lourds. Cette méthodologie comprend une variété de fonctions d'estimation, qui dépendent principalement de la vitesse et d'un certain nombre de fonctions fixes et prédéfinies.

MEET est basé sur des mesures sur la route et les paramètres sont extraits d'expériences de la vie réelle. Le principal défaut du modèle est son utilisation de paramètres fixes propres au véhicule pour tout véhicule dans une classe de poids donnée.

3.4 Modèle national d'inventaire des émissions atmosphériques (NAEI) [5]

Le modèle national d'inventaire des émissions atmosphériques (NAEI) a été développé pour une large gamme de secteurs, notamment l'agriculture, l'activité

domestique, l'industrie et les transports (NAEI 2012) [26]. Les émissions provenant du transport routier sont calculées soit à partir d'une combinaison de données de consommation totale de carburant et de propriétés du carburant, soit d'une combinaison de facteurs d'émissions liés à la conduite et de données sur le trafic routier. Les estimations d'émissions sont généralement calculées en appliquant un facteur d'émission à une statistique d'activité appropriée. C'est-à-dire en multipliant le facteur de la table de données développé par NAEI et la quantification de l'activité en question (émission = facteur x activité). De leur côté, les facteurs d'émission sont généralement dérivés de mesures effectuées sur un certain nombre de sources représentatives d'un secteur d'émission particulier.

3.5 Modèle de consommation de carburant élémentaire à quatre modes [4]

Un modèle élémentaire à quatre modes est décrit par Bowyer et al., dans un raffinement d'Akçelik (1982) [20] où était estimée la consommation de carburant pour le mode en arrêt, en croisière, en accélération et en décélération. Le modèle inclut les mêmes paramètres que la modèle 3.1, mais introduit de nouvelles considérations telles que la vitesse initiale, la vitesse finale et les paramètres liés à l'énergie. Il nécessite des données relatives à la distance, la vitesse de croisière, le temps d'inactivité et la qualité moyenne des routes en tant qu'entrées. On dit qu'un véhicule est en mode arrêt lorsque le moteur tourne, mais que la vitesse est inférieure à 5 km / h. Des estimations plus précises peuvent être faites si les vitesses initiale et finale pour chaque cycle d'accélération et de décélération sont connues.

Ce modèle suppose une perte minimale de l'information de conduite et donc une perte d'exactitude minimale dans les estimations de la consommation de carburant. Il est mieux adapté à l'estimation de la consommation de carburant pour les voyages à courte distance, mais son grand nombre de paramètres et l'existence de quatre fonctions peuvent rendre difficile à mettre en œuvre. Bowyer et al. ont fait une expérimentation avec le modèle instantané (4.1). Les résultats suggèrent que le modèle 4.5 peut prédire la consommation de carburant dans une marge d'erreur de 1%. Si les vitesses initiales et finales sont connues, le modèle

donne des estimations plus précises de la consommation de carburant et fournit des résultats très similaires à ceux du modèle instantané.

3.6 Modèle de consommation de carburant en vitesse de marche [4]

Le modèle de consommation de carburant en vitesse de marche est une forme agrégée du modèle élémentaire et a été introduit par Bowyer et al. (1985) [19] pour calculer la consommation de carburant pendant les périodes où un véhicule est en marche et est en mode inactif.

Il peut être également considéré comme une agrégation du modèle 4.5. Les modes d'accélération, de décélération et de croisière sont considérés ensemble dans une seule fonction au lieu d'être séparés. Il ne prend pas en compte le mode arrêt d'un véhicule, mais il peut être utilisé pour estimer la consommation de carburant dans une variété de situations de trafic, allant de voyages courts à longs trajets.

4. LOGICIELS DE CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES

Afin de contrer les désavantages de calculer de telles formules des modèles de calcul présentés juste avant, c'est-à-dire le temps d'exécution et la complexité de la tâche, certains outils ont vu le jour. Parmi les logiciels présents sur le marché, quatre importants sont présentés :

- COPERT 4;
- ARTEMIS;
- CopCETE;
- HBEFA.

4.1 COPERT (Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport) [4, 5]

COPERT est un logiciel Microsoft Windows qui est développé comme un outil européen pour le calcul des émissions du secteur du transport routier. Une

méthodologie détaillée prend en charge l'application logicielle. Il a été développé par Ntziachristos et Samaras en 2000 et aujourd'hui c'est COPERT 4 qui est utilisé. Il estime les émissions de tous les principaux polluants atmosphériques ainsi que les gaz à effet de serre produits par diverses catégories de véhicules.

Le programme informatique pour calculer les émissions estime les émissions des véhicules pour une gamme de véhicules par classification de moteur et type de véhicule. Il est piloté par une base de données des émissions en fonction de la classe du véhicule, de la technologie du moteur et de la vitesse. Semblable à MEET, COPERT utilise un certain nombre de fonctions de régression pour estimer la consommation de carburant, qui sont spécifiques aux véhicules de différents poids.

COPERT 4 est une version mise à jour de COPERT III incluant à la fois des éléments méthodologiques révisés et une interface utilisateur retravaillée visant à rassembler des inventaires nationaux annuels compliqués qui incluent plusieurs pays et années dans un seul fichier. Parmi les améliorations apportées, on retrouve de nouveaux facteurs d'émissions, de nouvelles corrections pour la dégradation des émissions due au kilométrage, une nouvelle méthodologie des véhicules lourds, une évolution du front à démarrage à froid, et plusieurs autres [27].

4.2 ARTEMIS

Le modèle ARTEMIS est une approche par « situations de trafic ». La situation de trafic est définie de la manière suivante [28] :

1. Zone ; urbaine ou rural
2. Type de voie ; autoroutes, voies de desserte de quartiers, etc.
3. Vitesse limite
4. Condition de trafic ; fluide, chargée, quasi saturée, bouchons

Malgré leurs différences, tout comme COPERT, ARTEMIS donne une bonne estimation des émissions de GES dû au trafic routier. C'est pour cette raison qu'il

est important d'avoir une bonne qualité des données d'entrée, telle que la vitesse de circulation, la pente de la voie, le taux de charge des remorques, etc. Cependant, la description de situations fines (impact du changement de priorité pour un carrefour, mise en place un système de régulation de vitesse, écoconduite) crée les limites du modèle [29].

4.3 CopCETE

L'outil CopCETE est plutôt basé sur la vitesse moyenne de circulation. La méthodologie de cet outil est similaire à celle de ARTEMIS. Toutefois, ARTEMIS met davantage en évidence l'augmentation des émissions aux heures de pointe que CopCETE. Ce résultat souligne l'incapacité de CopCETE à bien considérer les conditions de conduites pour une analyse à une fine échelle temporelle [30].

4.4 HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport)

Le HBEFA est une application de base de données Microsoft Access fournissant des facteurs d'émission. Ce dernier fournit des facteurs d'émission pour toutes les catégories actuelles de véhicules divisés en différentes catégories pour une grande variété de situations de circulation. Les facteurs d'émission pour tous les polluants réglementés, les polluants non réglementés les plus importants ainsi que la consommation de carburant et le CO_2 sont inclus [31].

Il existe deux versions, une ouverte à tous qui permet aux utilisateurs de visualiser les facteurs d'émission à différents niveaux de désagrégation. L'autre est la version pour les experts, c'est une version étendue avec des fonctionnalités supplémentaires.

5. ANALYSE ET ÉVALUATION

Dans les sections précédentes, les différents facteurs d'émissions et leur importance face à la quantité d'émissions qu'ils peuvent émettre ont été présentés.

Comme mentionné, plusieurs variables peuvent affecter les émissions et il existe une énorme difficulté à bien mesurer chacun des facteurs. D'ailleurs, en plus que la majorité présente une estimation marquée et que quatre facteurs identifiés ne soient pas pris en compte par aucune méthode de calcul, cela démontre que des améliorations sont possibles en ce qui concerne la qualité des résultats des calculs des émissions de GES.

Basée sur les analyses, l'importance moyenne de l'influence des facteurs sur les émissions, en ordre décroissant, est [6] :

1. Température ambiante;
2. Aérodynamisme;
3. Vitesse et accélération;
4. Type et condition de la chaussée;
5. Poids total (véhicule et chargement).

Tandis que le type de transmission, la fréquence de l'entretien, le type de conducteur et l'humidité ne sont pas pris en compte dans les formules.

Ensuite, différents modèles et outils de calcul ont été décrits en expliquant les situations les plus adaptés à ces derniers. Les modèles 4.1 (modèle instantané), 4.2 (CMEC), 4.5 (quatre modes) et 4.6 (vitesse de marche) peuvent tous s'appliquer à de petites distances. Toutefois les modèles 4.2 et 4.6 s'appliquent également à divers scénarios de trafic également sur de longues distances. Le modèle 4.3 (MEET), quant à lui, s'applique mieux sur de plus longs trajets. Tandis que le modèle 4.4 (NAEI) ne se base pas sur les distances parcourues, mais plutôt les secteurs. Elle est plus adaptée pour les secteurs de l'agriculture, les activités domestiques et le transport entre autres.

Quoique le détail mathématique de toutes les méthodes de calcul décrites n'ait pas été présenté dans ce document, il est important de noter que la majorité des paramètres utilisés dans les formules ont été évalués il y a plusieurs années. Attribuable aux nombreux avancements technologiques concernant plusieurs aspects des véhicules tels que le moteur, la forme du camion (aérodynamisme), etc., il est fort probable que les paramètres ne soient plus tous à jour.

De plus, étant donné l'importance du transport routier de marchandises, spécialement au Canada, il est primordial de réduire les émissions de GES. Pour ce faire, il y a 27 facteurs d'émissions qui ont été étudiés dans ce papier. Une fois tous les facteurs connus, il est plus facile pour un gestionnaire de flotte de tenter de réduire les émissions, tout en diminuant ses coûts d'exploitation. En effet, en sachant quels facteurs influencent le plus la consommation de carburant, il est donc plus facile de savoir où mettre les énergies et les investissements.

Néanmoins, il est important de noter que les émissions de GES émises directement des véhicules ne sont pas les uniques émissions à y être dégagées. De façon indirecte, l'importante utilisation du transport routier occasionne également d'autres sources de pollution. Elles ne prennent pas en compte [32] :

- L'abrasion pneus/chaussées, des roues/rails et du freinage.
- La construction, la rénovation et l'entretien des infrastructures de transport.
- La fabrication, la réparation et l'entretien des véhicules, notamment la vidange d'huile.
- La production et la distribution des différents carburants nécessaires pour faire fonctionner le véhicule.

6. CONCLUSION

La qualité de l'air est devenue un des enjeux importants dans les politiques de déplacement et de gestion de trafic. En général, les problèmes de la qualité de l'air, ainsi que l'efficacité des solutions éventuelles, sont évalués sur la base d'une modélisation des émissions issues du trafic routier.

Cette étude a expliqué les différences entre les méthodes de calculs existantes en démontrant quels facteurs sont pris en compte. De plus, 27 facteurs influençant les émissions de GES sont expliqués afin de connaître et comprendre lesquels ont le plus d'impact sur les émissions de sorte à faciliter la décision en entreprise. Selon l'analyse, la température ambiante, la vitesse (accélération, décélération) et l'aérodynamisme sont les facteurs qui contribuent le plus aux émissions de GES.

Les défis actuels sont alors surtout au niveau opérationnel. Les entreprises doivent chercher à minimiser leurs impacts négatifs sur l'environnement, où les émissions de carbone sont au sommet des priorités, en ajustant et modifiant leurs opérations. L'ouverture de nouveaux horizons et de nouvelles stratégies sont de sujets intéressants et essentiels afin de diminuer les émissions.

RÉFÉRENCES

[1] BEKTAŞ, T. & LAPORTE, G. (2011). *The Pollution-Routing Problem.* Transportation Research B: Methodological 45 (8), 1232-1250.

[2] Environnement Canada. *Émissions de gaz à effet de serre par secteur.* https://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=fr&n=F60DB708-1. Page consultée le 4 décembre 2016.

[3] Ressources naturelles Canada. *Guide de consommation de carburant 2016.* http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/transports/voitures-camions-legers/achats/7488. Page consultée le 4 décembre 2016.

[4] BEKTAŞ, T. & LAPORTE, G. & DEMIR, E. (2011). *A Comparative Analysis of Several Vehicle Emission Models for Road Freight Transportation.* Transportation Research Part D: Transport and Environment 6 (5), 347-357.

[5] BEKTAŞ, T. & LAPORTE, G. & DEMIR, E. (2015). *Green Vehicle routing.* Green Transportation Logistics: In Search of Win-Win Solutions. Harilaos N. Psaraftis Editor, Springer, Kongens Lyngby. 243-265.

[6] NOURI, P. & MORENCY, C. (2015). *Untangling the Impacts of Various Factors on Emission Levels of Light Duty Gasoline Vehicles.* Technical report CIRRELT-2015-53, Montréal.

[7] Gouvernement du Québec: Transports, Mobilité durable et Électrification des transports. *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers.* Édition 2013. https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/charges-dimensions/Documents/Guide-normes-charges-dimensions.pdf. (Page consultée le 4 décembre).

[8] Ma municipalité efficace. *La flotte de véhicules*. http://www.mamunicipaliteefficace.ca/66-efficacite-energetique-ges-annexe-a-categories-de-vehicules-et-machineries.html. (Page consultée le 4 décembre 2016).

[9] Ressources naturelles Canada. *Les faits : Le poids du véhicule a une incidence sur la consommation de carburant.* http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/transports/voitures-camions-legers/achats/16756. (Page consultée le 4 décembre 2016).

[10] CHEAH, L. & EVANS, C. & BANDIVADEKAR, A. & HEYWOOD, J. *Factor of two: Halving the Fuel Consumption of New U.S. Automobiles by 2035.* Laboratory for Energy and Environment Massachusetts Institute of Technology. http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/files/cheah_factorTwo.pdf (Page consultée le 6 décembre 2016)

[11] BELHASSINE, K. (2016). *Guide sur les méthodes de quantification du rejet de dioxyde de carbone (CO_2) dans les activités logistiques.*

[12] PARÉ-LE GAL, A. (2009). « Éliminer de la route les vieilles autos ». *La vie en vert.* http://vieenvert.telequebec.tv/sujets/464/eliminer-de-la-route-les-vieilles-autos. (Page consultée le 4 décembre 2016).

[13] Goodyear Canada. *Information sur les pneus et les véhicules : Diminuer la consommation d'essence.* http://fr.goodyear.ca/fr-CA/services/tire-care/improve-gas-mileage. (Page consultée le 4 décembre 2016).

[14] BOUCHER, S. (2016, 18 juillet). « *25 conseils pour réduire sa consommation d'essence* ». http://www.consoglobe.com/25-conseils-reduire-consommation-essence-cg/5. (Page consultée le 4 décembre 2016).

[15] Transports Canada. *Réduction de la traînée des véhicules lourds – Résultats d'essais* en soufflerie. https://www.tc.gc.ca/fra/programmes/environnement-etv-menu-fra-2980.html. (Page consultée le 28 janvier 2017)

[16] Gouvernement du Québec: Transports, Mobilité durable et Électrification des transports. *Guide des bonnes pratiques environnementales sur le plan*

technologique. https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-finan/entreprises-camionnage/aide-ecocamionnage/Documents/Guide-bonnes-pratiques-technologies.pdf. (Page consultée le 4 décembre 2016)

[17] Leung, D.Y.C. & D.J. Williams (2000). *Modelling of Motor Vehicle Fuel Consumption and Emissions Using a Power-Based Model*. Environmental Monitoring and Assessment. 65(1): p.21-29.

[18] TAYLOR, G. & PATTEN, J. (2006). *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption –Phase III*. Transportation Association of Canada. p. 98.

[19] BOWYER, D.P. & AKÇELIK, R. & BIGGS, D.C. (1985). *Guide to Fuel Consumption Analysis for Urban Traffic Management*. Australian Road Research Board Transport Research 32.

[20] AKÇELIK, R. (1982). *Progress in Fuel Consumption Modelling for Urban Traffic Management*. Australian Road Research Board Report 124.

[21] SCORA, G. & BARTH, M. (2000). *Comprehensive Modal Emission Model (CMEM), Version 2.0 Users Guide*. Technical Report. http://www.cert.ucr.edu/cmem/docs/CMEM_User_Guide_v3.01d.pdf. (Page consultée le 4décembre 2016).

[22] BARTH, M. & YOUNGLOVE, T. & SCORA, G. (2005). *Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model*. Technical Report. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transit and Highways, San Francisco.

[23] BARTH, M. & BORIBOONSOMSIN, K. (2008). *Real-world CO2 Impacts of Traffic Congestion*. Transportation Research Record 2058, 63–71.

[24] ROSS, M. (1994). *Automobile Fuel Consumption and Emissions: Effects of Vehicle and Driving Characteristics*. Annual Review of Energy and the Environment. 19, 75–112.

[25] HICKMAN, A.J. (1999). *MEET-Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption*. European Commission, DG VII. Technical

Report. http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200310/meet.pdf. (Page consultée le 4 décembre 2016)

[26] NAEI (2012). *Emission factors. Technical report, National Atmospheric Emissions Inventory*. http://naei.defra.gov.uk/data/emission-factors. (Page consultée le 4 décembre 2016).

[27] GKATZOFLIAS, D. & KOURIDIS, C. & NTZIACHRISTOS, L. & SAMARAS, Z. (2012). *COPERT 4, Version 9: Computer Program to calculate emissions from road transport*. Emisia: Mission for environment.

[28] ANDRÉ, M. & KELLER, M. & SJÖDIN, Å. & GADRAT, M. & MC CRAE, I. & DILARA, P. (2008). *The ARTEMIS European Tools for Estimating the Transport Pollutant Emissions*. INRETS, France.

[29] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire de France (2015). *Émissions de GES par le trafic routier*. Présenté par V. DEMEULES, Centre d'Études Techniques de l'Équipement, Normandie Centre.

[30] MEZDOUR, A. & BUGAJNY, C. (2014). *Retour d'expérience sur l'utilisation des modèles d'émissions dépolluants issus du trafic routier*. Cerema, IFSTTAR.

[31] HBEFA. *Welcome to HBEFA*. http://www.hbefa.net/e/index.html. (Page consultée le 4 décembre 2016).

[32] YAHYAOUI, M. (2016). *Calcul des émissions de GES dans le transport routier*.